

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開平6-174874

(43)公開日 平成6年(1994)6月24日

(51)Int.Cl.⁵

G 2 1 C 3/328

3/326

5/00

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

GDB A 7808-2G

7156-2G

7156-2G

G 2 1 C 3/ 30

3/ 32

GDB T

GDB E

審査請求 未請求 請求項の数9(全13頁)

(21)出願番号

特願平4-324392

(22)出願日

平成4年(1992)12月3日

(71)出願人 000005108

株式会社日立製作所

東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地

(72)発明者 梶見 亮司

茨城県日立市大みか町七丁目2番1号 株

式会社日立製作所エネルギー研究所内

(72)発明者 青山 肇男

茨城県日立市大みか町七丁目2番1号 株

式会社日立製作所エネルギー研究所内

(72)発明者 小山 淳一

茨城県日立市大みか町七丁目2番1号 株

式会社日立製作所エネルギー研究所内

(74)代理人 弁理士 春日 謙

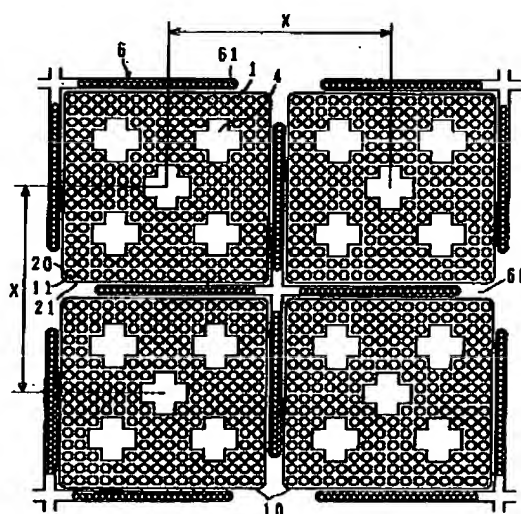
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 燃料集合体及び炉心

(57)【要約】

【目的】熱的余裕及び炉停止余裕を確保することにより燃料集合体の大型化を図ることができる燃料集合体及びこれを用いた炉心を提供する。

【構成】隣接する燃料集合体10、10間の中心間距離Xは $X \approx 2.3$ cmであり、従来に比し約1.5倍と大型化が図られている。ギャップ水領域厚さは従来と同じ約1.6mmでありギャップ水領域は相対的に薄くなっている。一方、H/U比は従来と同じ値約5であり、ギャップ水領域に存在していた非沸騰水が減少した分が、水ロッドとしてチャンネルボックス内に配置される。これによって水ロッド内横断面積/燃料ペレットの横断面積 ≈ 0.6 となり、局所出力ピーキング係数の値を低減し熱的余裕を増大することができる。また水ロッド4の横断面積を 1.5cm^2 として余剰反応度を低減するので炉停止余裕を確保できる。



- 1: 燃料棒
- 4: 水ロッド
- 6: 十字型制流棒
- 10: 燃料集合体
- 11: 燃料ペレット
- 20: 被覆管
- 21, 22: チャンネルボックス
- 60: ギャップ水領域
- 61: 吸収棒

【特許請求の範囲】

【請求項1】 核分裂性物質を含む燃料ペレットを被覆管に充填した多数の燃料棒と核分裂により発生する中性子を減速する減速材を満たした少なくとも1本の減速棒とを有する燃料集合体において、

前記減速棒の減速材が満たされる部分の横断面積の総和と前記燃料ペレットの横断面積の総和との比の軸方向平均値が0.4以上であることを特徴とする燃料集合体。

【請求項2】 請求項1記載の燃料集合体において、前記減速棒1本当りの減速材が満たされる部分の横断面積が14～50cm²であることを特徴とする燃料集合体。

【請求項3】 請求項1記載の燃料集合体において、前記多数の燃料棒の上端部を束ねる上部タイプレートの外縁を鉛直下方に伸ばした面で囲まれる水平断面における前記減速材の横断面積の総和と前記燃料ペレットの横断面積の総和との比が2.7～3.4であることを特徴とする燃料集合体。

【請求項4】 請求項1記載の燃料集合体において、前記減速棒の少なくとも1本は減速材の流量に対応して管内の水位が上下する二重管水ロッドであることを特徴とする燃料集合体。

【請求項5】 請求項1～4記載のいずれか1項記載の燃料集合体を有する炉心。

【請求項6】 請求項5記載の炉心において、前記燃料集合体の周囲のギャップ水領域に満たされた減速材の横断面積の総和と前記燃料ペレットの横断面積の総和との比が0.7以下であることを特徴とする炉心。

【請求項7】 請求項5記載の炉心において、中性子吸収材を含む複数の吸収棒を十字型断面形状に束ねて構成され前記燃料集合体の周囲のギャップ水領域に挿入される制御棒を有し、前記吸収棒の表面積の総和と燃料棒の表面積の総和との比が0.20以上であることを特徴とする炉心。

【請求項8】 請求項5記載の炉心において、中性子吸収材を含む複数の吸収棒を十字型断面形状に束ねて構成され前記燃料集合体の周囲のギャップ水領域に挿入される制御棒を有し、前記吸収棒の横断面積の総和と前記ギャップ水領域の横断面積の総和との比が0.4以上であることを特徴とする炉心。

【請求項9】 請求項5記載の炉心において、前記減速材の横断面積の総和と前記燃料ペレットの横断面積の総和との比が3.0～3.5であることを特徴とする炉心。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は沸騰水型原子炉(BWR)に係り、特に、熱的余裕及び炉停止余裕を確保しつつ燃料集合体を大型化して燃料集合体数を削減することにより、燃料交換作業の省力化に好適な燃料集合体及び炉心に関する。

【0002】

【従来の技術】 BWRの燃料集合体は、「軽水炉」(秋山守著、同文書院刊)に記載のように、一般に、核分裂性物質を含む燃料ペレットを被覆管に充てんした燃料棒を正方格子状に多数束ね、外幅が約14cmの断面形状が正方形のチャンネルボックスで覆って構成される。炉心は上記の燃料集合体をさらに束ねて円柱状に形成される。燃料としては、濃縮ウランあるいはアルミニウムを富化したウランが酸化物の化学形態で使用される。

【0003】 炉心の反応度は燃料の燃焼に伴って減少していくので、運転サイクル末期でも原子炉が臨界を保つように、運転サイクル初期には燃料を臨界量よりも多く装荷している。その結果生じる余剰反応度は、ガドリニア等の可燃性毒物を燃料に混合すると共に、炭化硼素あるいはハフニウムからなる十字型の制御棒を隣接する複数の燃料集合体の間に挿入することによって中性子の吸収量を調節して制御している。

【0004】 燃料集合体のチャンネルボックスの周囲には十字型の制御棒を挿入するために、制御棒ブレード厚の約2倍の非沸騰水で満たされたギャップ水領域を設けている。また燃料集合体中央部には、中性子束分布平坦化の観点から、やはり非沸騰水を満たした水ロッドを設けている。これらの非沸騰水領域と燃料物質量とに依存する炉心平均の水素対ウラン原子数比(以下、適宜H/U比という)は、主として省ウラン資源の観点から、所要ウラン濃縮度が最小となるように4～5の範囲に調整されている。

【0005】 一方、原子炉の運転を停止する際には蒸気が水に変わり水の量が増えるので、余剰反応度が増大する。従って炉停止余裕の確保が重要となる。燃料集合体及び炉心の炉停止余裕の増大については以下の2つの公知技術がある。

①特開昭63-231293号公報

この公知技術では、チャンネルボックス内に存在する全燃料棒内のペレットの横断面積に対する、チャンネルボックス外の飽和水領域であるギャップ水領域横断面積の比を1以上とすることにより、中性子平均エネルギーを減少し、炉心上下間に存在する中性子減速効果の違いを減少して炉停止余裕の増大を図るものである。

【0006】 ②特開平2-12088号公報

この公知技術では、燃料集合体の中心部に、チャンネル内ボックス内横断面積の9.1%以上の非沸騰水領域をもつように構成することにより余剰反応度を低減し、炉停止余裕の増大を図るものである。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】 従来、一般的に、出力を高める場合には、燃料集合体数を増やすことで対応しているが、燃料集合体数を増やすと、定期検査における燃料交換体数や燃料移動体数が増大し、燃料交換作業に費やす時間や労働力が増えてプラント利用率が低下する

恐れもあり、必ずしも出力を高めたことによるスケールメリットが得られないという問題がある。したがって、燃料集合体を大型化して燃料集合体数を減らすことが燃料交換の省力化の観点から有効である。

【0008】ところが燃料集合体を大型化すると、炉心の非均質性が増大するため、炉心の径方向出力ピーキング係数が増大する。さらに、炉心の大きさ一定のもとでは燃料集合体の大型化によって燃料集合体の数が減る。したがって制御棒の数が減って制御棒のブレード幅の総延長が相対的に短くなるので、制御棒価値が減少し炉停止余裕が減少する。よって燃料集合体の大型化に際してはこれらを防止する手段を講じる必要がある。

【0009】しかしながら、燃料集合体の大型化に際して上記公知技術を適用した場合には以下の欠点が存在する。公知技術①においては、中性子減速効果の減少により炉停止余裕は増大するが、燃料ペレット横断面積に対するギャップ水領域横断面積の比を増加させるので熱的余裕は減少する。

【0010】公知技術②においては、非沸騰水領域の横断面積を、チャンネル内横断面積を基準として限定するので、燃料棒の充填状態のいかんにより炉停止余裕の増大の実効が得られない場合がある。熱的余裕についても同様である。また、燃料として混合酸化物燃料棒を使用する場合であるので、この数値限定の値はウラン燃料を使用する場合に対しては汎用性がない。

【0011】本発明の第1の目的は、燃料集合体の大型化を図ることができる燃料集合体及びこれを用いた炉心を提供することである。

【0012】本発明の第2の目的は、熱的余裕を確保することにより燃料集合体の大型化を図ることができる燃料集合体及びこれを用いた炉心を提供することである。

【0013】本発明の第3の目的は、炉停止余裕を確保することにより燃料集合体の大型化を図ることができる燃料集合体及びこれを用いた炉心を提供することである。

【0014】なお、本発明では、燃料体数を半減することを念頭におき、燃料集合体のサイズを約1.5倍以上とすることを大型化の目安とした。

【0015】

【課題を解決するための手段】上記第1及び第2の目的を達成するために、本発明によれば、核分裂性物質を含む燃料ペレットを被覆管に充填した多数の燃料棒と核分裂により発生する中性子を減速する減速材を満たした少なくとも1本の減速棒とを有する燃料集合体において、前記減速棒の減速材が満たされる部分の横断面積の総和と前記燃料ペレットの横断面積の総和との比の軸方向平均値が0.4以上であることを特徴とする燃料集合体が提供される。

【0016】上記第1及び第3の目的を達成するために、好ましくは、前記燃料集合体において、前記減速

棒1本当たりの減速材が満たされる部分の横断面積が14～50cm²であることを特徴とする燃料集合体が提供される。

【0017】また好ましくは、前記燃料集合体において、前記多数の燃料棒の上端部を束ねる上部タイプレートの外縁を鉛直下方に伸ばした面で囲まれる水平断面における前記減速材の横断面積の総和と前記燃料ペレットの横断面積の総和との比が2.7～3.4であることを特徴とする燃料集合体が提供される。

10 【0018】上記第1の目的を達成するために、さらに好ましくは、前記燃料集合体において、前記減速棒の少なくとも1本は減速材の流量に対応して管内の水位が上下する二重管水ロッドであることを特徴とする燃料集合体が提供される。

【0019】また上記第1～第3の目的を達成するために、本発明によれば、上記燃料集合体を有する炉心が提供される。

20 【0020】さらに上記第1及び第2の目的を達成するために、好ましくは、前記炉心において、前記燃料集合体の周囲のギャップ水領域に満たされた減速材の横断面積の総和と前記燃料ペレットの横断面積の総和との比が0.7以下であることを特徴とする炉心が提供される。

【0021】また上記第1及び第3の目的を達成するために、好ましくは、前記炉心において、中性子吸収材を含む複数の吸収棒を十字型断面形状に束ねて構成され前記燃料集合体の周囲のギャップ水領域に挿入される制御棒を有し、前記吸収棒の表面積の総和と燃料棒の表面積の総和との比が0.20以上であることを特徴とする炉心が提供される。

30 【0022】さらに好ましくは、前記炉心において、中性子吸収材を含む複数の吸収棒を十字型断面形状に束ねて構成され前記燃料集合体の周囲のギャップ水領域に挿入される制御棒を有し、前記吸収棒の横断面積の総和と前記ギャップ水領域の横断面積の総和との比が0.4以上であることを特徴とする炉心が提供される。

【0023】また好ましくは、前記炉心において、前記減速材の横断面積の総和と前記燃料ペレットの横断面積の総和との比が3.0～3.5であることを特徴とする炉心が提供される。

40 【0024】

【作用】以上のように構成した本発明においては、減速棒の減速材が満たされる部分の横断面積/燃料ペレットの横断面積の軸方向平均値 ≥ 0.4 とすることにより、減速棒の減速材の横断面積を増やしギャップ水領域の横断面積を減らして局所出力ピーキング係数の値を低減し、熱的余裕を確保する。

【0025】また、減速棒1本当たりの減速材の横断面積を14～50cm²とすることにより、余剰反応度を低減して炉停止余裕を確保する。さらに、上部タイプレートの外縁を鉛直下方に伸ばした面で囲まれる水平断面に

における減速材の横断面積の総和／燃料ペレットの横断面積の総和 $\approx 2.7 \sim 3.4$ とすることにより、余剰反応度を低減して炉停止余裕を確保する。また減速棒の少なくとも1本を二重管水ロッドとすることにより、流量制御によるスペクトルシフトの効果を増幅してウラン濃縮度を低減した制御棒を挿入しない運転を行う。

【0026】また、燃料集合体の周囲のギャップ水領域に満たされた減速材の横断面積の総和／燃料ペレットの横断面積の総和 ≤ 0.7 とすることにより、局所出力ピーキング係数の値を低減し、熱的余裕を確保する。さらに吸収棒の表面積の総和／燃料棒の表面積の総和 ≥ 0.20 とすることにより、制御棒価値を高め炉停止余裕を確保する。また吸収棒の横断面積の総和／ギャップ水領域の横断面積の総和 ≥ 0.4 とすることにより、制御棒価値を高め炉停止余裕を確保する。さらに減速材の横断面積の総和／燃料ペレットの横断面積の総和 $\approx 3.0 \sim 3.5$ とすることにより、余剰反応度を低減して炉停止余裕を確保する。

【0027】

【実施例】以下、本発明の実施例を図1～図15により説明する。本発明の第1の実施例を図1～図7により説明する。本実施例の燃料集合体の断面図を図1に、燃料集合体のチャンネルボックスを取り除いた状態を図2に示す。図1は炉心の一部である隣接する4つの燃料集合体についてその水平断面を示した図である。図1において、燃料集合体10は、ジルカロイの被覆管20に濃縮ウラン酸化物からなる燃料ペレット11を充填した燃料棒1と、減速材として非沸騰水を満たした横断面十字型の水ロッド4と、燃料棒1と水ロッド4とを束ねて覆うジルカロイ製の角筒状のチャンネルボックス21とで構成されている。隣接する燃料集合体10、10間の中心間距離Xは $X \approx 2.3\text{cm}$ であり、従来の約 1.5cm に比し約1.5倍と大型化されている。また隣接する4つの燃料集合体10、10、10、10の間のギャップ水領域60には、余剰反応度を制御する目的で、中性子吸収棒として炭化硼素を含む吸収棒61を束ねた十字型制御棒6が挿入される構成であり、1つの燃料集合体10についてみると、正方形断面の4辺にあたる4つの面のうち2面を一組としてその一組に対し1つの制御棒6がそれら2面に近接するような形で挿入可能である。すなわち、燃料集合体10の正方形断面のすべての面に近接して制御棒6が挿入可能である。

【0028】図2において、燃料棒1及び水ロッド4は上端を上部タイプレート81に支持され、下端を下部タイプレート82に支持され、かつ中間部の複数箇所をスベサ83により保持されている。図1に示すチャンネルボックス21はこれら燃料棒1及び水ロッド4で構成された燃料バンドルを取り囲んでいる。

【0029】燃料棒1は、燃料ペレット11のウラン濃縮度は約6%であり、その径は約9mm、また燃料棒1の

径は約10mmであり、この燃料棒1が1.6行1.6列で196本、約1.3mmの間隔をもって配列されている。水ロッド4は、横断面積が約 15cm^2 のものが1つの燃料集合体10に5本配置され、H/U比は従来技術と同じ約5となっている。制御棒6は、直径が約8mmである吸収棒61をブレード当たり24本配置して構成される。制御棒6のブレード厚さは従来と同じ約8mmである。

【0030】ギャップ水領域60は非沸騰水で満たされており、このギャップ水領域60の厚さは従来と同様に制御棒ブレード厚さの約2倍の厚さ（約16mm）である。したがって燃料集合体が大きくなった分ギャップ水領域60は相対的に薄くなる。即ち、ギャップ水領域60の非沸騰水は従来よりも少なくなる。一方、H/U比は従来と同じ値であり約5であるから、ギャップ水領域60の非沸騰水が減少した分が、水ロッド4の非沸騰水が拡大した形でチャンネルボックス21内に配置されることとなる。また本実施例の燃料集合体10においては、水ロッド4の非沸騰水が満たされる部分の横断面積の総和と燃料ペレット11の横断面積の総和との比の軸方向平均値（以下、水ロッド内横断面積／燃料ペレット横断面積という。） ≈ 0.6 、水ロッド4の1本当たり非沸騰水が満たされる部分の内横断面積（以下、水ロッド1本当たりの内横断面積という。） $\approx 15\text{cm}^2$ となっている。さらに炉心あたりでみると、燃料集合体10の周囲のギャップ水領域60に満たされた非沸騰水の横断面積の総和と燃料ペレット11の横断面積の総和との比（以下、ギャップ水領域横断面積／燃料ペレット横断面積という。） ≈ 0.5 、吸収棒61の表面積の総和と燃料棒1の表面積の総和との比（以下、吸収棒の表面積／燃料棒の表面積という。） ≈ 0.2 、吸収棒61の横断面積の総和とギャップ水領域60の横断面積との比（以下、吸収棒の横断面積／水ギャップ水領域横断面積という。） ≈ 0.4 である。

【0031】本実施例の燃料集合体10は、水ロッド4の横断面積を増やすことにより熱的余裕を確保すると共に、水ロッド4の横断面積を最適化して余剰反応度を低減することにより炉停止余裕を確保し、燃料集合体10の大型化を図ったものである。以下、このことを図3～図5により説明する。

【0032】熱的余裕を増大するためには、燃料集合体における局所出力ピーキング係数を低減する必要がある。本願発明者等は、径方向の局所出力ピーキング係数と水ロッド内横断面積／燃料ペレット横断面積との関係を検討した結果、図3に示す結果を得た。

【0033】図3は、燃料集合体を炉心に配置し、ギャップ水領域の厚さを一定に保ちつつその大きさを大型化し、ギャップ水領域の面積が増大しない分は水ロッドの面積を増やすことによってH/U比を約5に固定し、水ロッド内横断面積／燃料ペレット横断面積を変化させて径方向の局所出力ピーキング係数の変化を求めたもので

ある。図3において、従来技術における水ロッド内横断面積/燃料ペレット横断面積 ≈ 0.2 から水ロッド内横断面積を増加させると、ギャップ水の減少によって燃料集合体の外側の燃料棒近傍の水が減少するので、局所出力ピーキング係数は低下する。しかしある程度水ロッド内横断面積が増加すると、燃料集合体の内側の燃料棒の出力がその近傍の水が増加することによって増加してくるので局所出力ピーキング係数の値は下げ止まり、水ロッド内横断面積がそれ以上増加してもほとんど低下しなくなる。

【0034】図3より、水ロッド内横断面積/燃料ペレット横断面積の値が0.4付近になると、局所出力ピーキング係数の値の低下割合は変曲点を示し、この後次第に局所出力ピーキング係数の値の低下は飽和していく。したがって、燃料集合体の大型化に際して局所出力ピーキング係数を小さくするためには、水ロッド内横断面積/燃料ペレット横断面積 ≥ 0.4 とすることが有効であることが分かった。

【0035】本実施例の燃料集合体10においては、水ロッド4の横断面積を増やして、ギャップ水領域60の横断面積を減らすことによって、水ロッド内横断面積/燃料ペレットの横断面積 ≈ 0.6 である。したがって、局所出力ピーキング係数の値を低減でき、熱的余裕を増大することができる。

【0036】一方、炉停止余裕を増大するには余剰反応度を低減させることが有効である。本願発明者等は、燃料集合体内における水ロッド1本当たりの内横断面積と燃料集合体の反応度を表す無限増倍率及び余剰反応度（冷温時反応度差－運転時反応度差）とを調べた結果、図4に示す関係を得た。

【0037】図4は、 H/U 比 $\approx 5 \sim 6$ の一定値に固定した炉心で、水ロッドのトータルの横断面積の和は変えずに、水ロッドの本数を増減して水ロッド1本当たりの内横断面積を変化させて、冷温時及び運転時の無限増倍率の変化（図4（a））と運転時冷温時反応度差の変化（図4（b））とを求めたものである。なお、複数の水ロッドが隣接する場合には、水ロッド1本当たりの横断面積としてそのひとまとまりの水ロッドの横断面積をとるものとする。図4（a）において、従来技術における水ロッド1本当たりの内横断面積は、約 1.2cm^2 から1本当たりの内横断面積を増加させると、冷温時と運転時の反応度はいずれも低下する。しかしこのとき冷温時の反応度の低下幅がより大きいので、図4（b）に示すように運転時冷温時反応度差は次第に低下し、水ロッドの横断面積が約 5.0cm^2 になるとついに冷温時の無限増倍率が運転時の無限増倍率を下回り、その差はマイナスとなる。

【0038】なお図4（a）及び図4（b）の関係は、固定する H/U 比の値は $H/U \approx 5 \sim 6$ であれば、燃料集合体の種類や大小に係わらず成立する。

【0039】図4より、水ロッド1本当たりの内横断面積が 1.4cm^2 以上であれば、従来以上に運転時冷温時の反応度差を低減し炉停止余裕の増大に効果がある。また水ロッド1本当たりの内横断面積が約 5.0cm^2 で冷温時の無限増倍率が運転時の無限増倍率を下回ってしまう。したがって、燃料集合体の大型化に際して炉停止余裕を増大させるためには、水ロッド1本当たりの内横断面積を $1.4 \sim 5.0\text{cm}^2$ とすれば有効であることが分かった。

【0040】本実施例の燃料集合体10においては、水ロッド4の横断面積は 1.5cm^2 であるので、上記条件を満たし、余剰反応度を低減でき炉停止余裕を増大させることができる。

【0041】次に本実施例の燃料集合体10を用いた炉心においては、熱的余裕増大の観点からの炉心の局所出力ピーキング係数の低減に関し、本願発明者等は、径方向の局所出力ピーキング係数とギャップ水領域横断面積/燃料ペレット横断面積との関係を検討した結果、図5に示す結果を得た。これは、図3に示す水ロッド内横断面積/燃料ペレット横断面積と径方向の局所出力ピーキング係数との関係を H/U 比が約5で一定であることからギャップ水領域横断面積/燃料ペレット横断面積と径方向の局所出力ピーキング係数との関係に換算したものであり、横軸が燃料集合体の水ロッド内横断面積/燃料ペレット横断面積でなく炉心におけるギャップ水領域横断面積/燃料ペレット横断面積となつて数値が変わることを除いて、定性的な傾向は図3とほぼ同様である。すなわち、ギャップ水領域横断面積/燃料ペレット横断面積の値が0.7付近になった以後は局所出力ピーキング係数の値の低下は飽和していく。したがって、燃料集合体の大型化に際して局所出力ピーキング係数を小さくするためには、ギャップ水領域横断面積/燃料ペレット横断面積 ≥ 0.7 とすることが有効であることが分かった。

【0042】本実施例の燃料集合体10を用いた炉心においては、水ロッド4の横断面積を増やして、ギャップ水領域60の横断面積を減らすことによって、ギャップ水領域横断面積/燃料ペレットの横断面積 ≈ 0.5 である。したがって、局所出力ピーキング係数の値を低減でき、熱的余裕を増大させることができる。

【0043】一方、本実施例の燃料集合体10を用いた炉心においては、上記燃料集合体10の構成による炉停止余裕の増大効果に加え、制御棒値が増大することによつても炉停止余裕を増大させることができる。以下、このことを図6及び図7を用いて説明する。

【0044】本願発明者等は、炉心に用いる燃料集合体の燃料棒の表面積と吸収棒の表面積、及びギャップ水領域60の面積との関係を検討した結果、図6及び図7に示す結果を得た。

【0045】図6は、炉心において、燃料集合体中心間距離 $X \approx 1.5\text{cm}$ （従来技術と同じ）の場合と燃料集合体

中心間距離 $X \approx 23\text{cm}$ (大型化) の場合とについて、 H/U 比 ≈ 5 に固定した条件で吸収棒表面積/燃料棒表面積を変化させ、従来技術の炉停止余裕の値を基準とした場合の炉停止余裕の値の変化を求めたものである。図6において、 $X \approx 15\text{cm}$ の場合も 23cm の場合も、吸収棒の表面積が相対的に増加するにともない制御棒価値が増加し、炉停止余裕が増加する右上がりの曲線となる特性を示す。燃料集合体を大型化して $X \approx 23\text{cm}$ とすると、炉心当たりの制御棒数が減ることにより制御棒価値が減少するので $X \approx 15\text{cm}$ の場合に比し特性曲線が下方へ移行する。図6より、炉心に用いる燃料集合体を大型化し燃料集合体中心間距離が $X \approx 23\text{cm}$ となった場合においても、吸収棒表面積/燃料棒表面積の値が 0.20 以上では、従来技術 ($X \approx 15\text{cm}$ の燃料集合体を吸収棒表面積/燃料棒表面積 ≈ 0.13 で使用) と同等の炉停止余裕の値を確保できることが分かった。

【0046】本実施例の燃料集合体10を用いた炉心においては、正方形断面のすべての面に対し制御棒6を挿入して制御棒価値を高めることによって、吸収棒表面積/燃料棒表面積の値は約 0.2 である。したがって、炉停止余裕を確保することができる。

【0047】図7は、炉心において、燃料集合体中心間距離 $X \approx 15\text{cm}$ (従来技術と同じ) の場合と燃料集合体中心間距離 $X \approx 23\text{cm}$ (大型化) の場合とについて、 H/U 比 ≈ 5 に固定した条件で吸収棒横断面面積/ギャップ水領域横断面面積を変化させ、従来技術の炉停止余裕の値に対する炉停止余裕の変化を求めたものである。図7においても、図6とほぼ同様の特性を示し、炉心に用いる燃料集合体を大型化し燃料集合体中心間距離が $X \approx 23\text{cm}$ となった場合においても、吸収棒横断面面積/ギャップ水領域横断面面積の値が 0.4 以上であれば、従来の炉心 ($X \approx 15\text{cm}$ の燃料集合体で構成された炉心を吸収棒横断面面積/ギャップ水領域横断面面積 ≈ 0.25 で使用) と同等の炉停止余裕の値を確保できることが分かる。

【0048】本実施例の燃料集合体10を用いた炉心においては、正方形断面のすべての面に近接して制御棒6を挿入して制御棒価値を高め、吸収棒横断面面積/ギャップ水領域横断面面積の値を 0.4 とするので、炉停止余裕を確保することができる。

【0049】以上説明したように、本実施例の燃料集合体10によれば、水ロッド4の横断面面積を増やしてギャップ水領域60の横断面面積を減らし水ロッド内横断面面積/燃料ペレットの横断面面積 ≈ 0.6 とするので熱的余裕を確保でき、また水ロッド4の横断面面積を 15cm^2 として余剰反応度を低減するので炉停止余裕を確保できる。よって、燃料集合体を大型化して燃料集合体数を低減できるので、燃料交換作業の省力化が可能となる。

【0050】また、本実施例の燃料集合体10を用いた炉心によれば、ギャップ水領域60の横断面面積を減らし、ギャップ水領域横断面面積/燃料ペレットの横断面面積

≈ 0.5 とするので、局所出力ピーキング係数の値を低減でき、熱的余裕を確保することができ、燃料集合体10の構成による上記炉停止余裕増大効果を得る。また、さらに本実施例の燃料集合体10を用いた炉心によれば、上記炉停止余裕増大効果に加え、正方形断面のすべての面に対し制御棒6を挿入して制御棒価値を高め吸収棒表面積/燃料棒表面積の値を 0.2 とし、また吸収棒横断面面積/ギャップ水領域横断面面積の値を 0.4 とするので、炉停止余裕を確保できる。よって、炉心における燃料集合体数を低減できるので、燃料交換作業の省力化が可能となる。

【0051】なお、上記第1の実施例の燃料集合体10において、水ロッド4を水素化ジルコニウムの棒に置き換えてもよい。このような固体減速棒は、水ロッドとほぼ同等の減速能力をもつので、上記の実施例と同様に炉停止余裕を確保できる。この燃料集合体を装荷して構成した炉心においても同様の効果が得られる。

【0052】本発明の第2の実施例を図8～図12により説明する。本実施例の燃料集合体15の断面図を図8に示す。図8は炉心の一部である隣接する4つの燃料集合体についてその水平断面を示した図である。図1と共通の部品については共通の番号で示す。

【0053】第1の実施例と異なる点は、水ロッド14の断面形状が正方形となりやや大きくなったこと (横断面面積は約 20cm^2) と、これに伴い燃料棒1の数が16本減って176本になり H/U 比は約6となったことである。また本実施例の燃料集合体15においては、水ロッド内横断面面積/燃料ペレット横断面面積 ≈ 1.0 、水ロッド1本当たりの内横断面面積 $\approx 20\text{cm}^2$ 、チャンネルボックス21内における減速材 (沸騰水及び非沸騰水) の横断面面積の総和と燃料ペレット11の横断面面積の総和との比 (以下、燃料集合体平均の水対燃料体積比という。) ≈ 2.7 となっており、さらに炉心あたりでみると、ギャップ水領域横断面面積/燃料ペレット横断面面積 ≈ 0.6 、炉心の減速材 (沸騰水及び非沸騰水) の横断面面積の総和と燃料ペレット11の横断面面積の総和との比 (以下、炉心平均の水対燃料体積比という。) ≈ 3.3 である。

【0054】本実施例において、熱的余裕増大の観点からの燃料集合体における局所出力ピーキング係数の低減に関し、第1の実施例における図3と同様に、径方向の局所出力ピーキング係数と水ロッド内横断面面積/燃料ペレット横断面面積との関係を検討した結果、図3により説明した燃料集合体10の場合と同様な図9に示す結果を得た。

【0055】図9において、図2と異なる点は H/U 比 ≈ 6 である点のみで、定性的な傾向はほぼ同様である。すなわち、出力ピーキング係数の値の低下は水ロッド内横断面面積/燃料ペレット横断面面積の値が 0.4 付近で変曲点を示し、以後は局所出力ピーキング係数の値の低下

1.1

は飽和していく。したがって、燃料集合体の大型化に際して局所出力ピーキング係数を小さくするためには、水ロッド内横断面積／燃料ペレット横断面積 ≥ 0.4 とすることが有効であることが分かった。すなわち、 H/U 比 ≈ 5 である第1の実施例と同様の結果を得た。

【0056】本実施例の燃料集合体15においては、水ロッド内横断面積／燃料ペレットの横断面積 ≈ 1.0 である。したがって、局所出力ピーキング係数の値を低減でき熱的余裕を増大させることができる。

【0057】また、本実施例の燃料集合体15の水ロッド1本当たりの内横断面積は 20cm^2 であって、第1の燃料集合体10と同様に、図4における燃料集合体の大型化に際し余剰反応度を低減するための条件である水ロッド1本当たりの内横断面積 $14\sim 50\text{cm}^2$ を満たすので、余剰反応度を低減でき炉停止余裕を増大させることができる。

【0058】一方、本願発明者等は、本実施例の燃料集合体15において、上記水ロッド1本当たりの内横断面積の最適化による炉停止余裕の増大の効果に加え、燃料集合体平均の水対燃料体積比を最適化することによっても炉停止余裕を増大させることができることが分かった。以下、このことを図10を用いて説明する。

【0059】図10は、減速材のうち沸騰水（燃料集合体15のチャンネルボックス21内の燃料棒1及び水ロッド14間の沸騰水）の割合が一定（沸騰水横断面積／燃料ペレット横断面積 ≈ 1.7 、平均ボイド率40％で従来技術と同じ）の条件下で、燃料集合体内の水対燃料体積比を変化させて、冷温時及び運転時の無限増倍率の変化と運転時冷温時反応度差の変化とを求めたものである。図10において、従来の燃料集合体における水対燃料体積比の値（約2.3）から水の体積比を増加させていくと、運転時においては、水による中性子の減速効果が増大して無限増倍率は緩やかに増加するが、水対燃料体積比をさらに増加させると水による中性子の吸収効果が減速効果を上回るようになり無限増倍率は次第に緩やかに減少するようになる。また冷温時においては、運転時よりも水の密度が大きいために、図示する範囲においては常に中性子の吸収効果のほうが減速効果を上回っており、水の体積比の増加に伴って無限増倍率は常に減少する。

【0060】図10より、燃料集合体平均の水対燃料体積比 ≈ 2.7 以上であれば、従来以上に運転時冷温時の反応度差を低減し炉停止余裕の増大に効果がある。一方水対燃料体積比 ≈ 3.4 で運転時における無限増倍率の値が従来技術の値を下回ってしまう。したがって、燃料集合体の大型化に際して炉停止余裕を増大させるためには、燃料集合体平均の水対燃料体積比を $2.7\sim 3.4$ とすれば有効であることが分かった。

【0061】本実施例の燃料集合体15においては、水対燃料体積比 ≈ 2.7 であるので、上記条件を満たし、

1.2

運転時の反応度をあまり低下させることなく冷温時の反応度を低減し余剰反応度を低減でき、炉停止余裕を増大させることができる。

【0062】なお図8に示したチャンネルボックスを取り除いた状態において上記の条件を考える場合は、燃料集合体平均の水対燃料体積比の値として、燃料棒1の上端部を束ねる上部タイプレート81（図2参照）の外縁を鉛直下方に伸ばした面で囲まれる領域の減速材（沸騰水及び非沸騰水）の横断面積の総和と燃料ペレット11の横断面積の総和との比をとればよい。

【0063】次に本実施例の燃料集合体15を用いた炉心においては、熱的余裕の向上の観点からの炉心の局所出力ピーキング係数の低減に関し、本願発明者等は、径方向の局所出力ピーキング係数とギャップ水領域／燃料ペレット横断面積との関係を検討した結果、図11に示す結果を得た。これは、図9に示す水ロッド内横断面積／燃料ペレット横断面積と径方向局所出力ピーキング係数との関係を H/U 比が約6で一定であることからギャップ水領域横断面積／燃料ペレット横断面積と径方向局所出力ピーキング係数との関係に換算したものであり、図11において図9と異なる点は、横軸が燃料集合体の水ロッド内横断面積／燃料ペレット横断面積でなく炉心におけるギャップ水領域横断面積／燃料ペレット横断面積となって数値が変わる点を除いて、定性的な傾向は図9とほぼ同様である。すなわち、ギャップ水領域横断面積／燃料ペレット横断面積の値が1.2付近になった以後は局所出力ピーキング係数の値の低下は飽和していく。したがって、燃料集合体の大型化に際して局所出力ピーキング係数を小さくするためには、ギャップ水領域横断面積／燃料ペレット横断面積 ≥ 1.2 とすることが有効であることが分かった。

【0064】本実施例の燃料集合体15を用いた炉心においては、水ロッド4の横断面積を増やして、ギャップ水領域60の横断面積を減らすことによって、ギャップ水領域横断面積／燃料ペレットの横断面積 ≈ 0.6 である。したがって、局所出力ピーキング係数の値を低減でき、熱的余裕を増大することができる。

【0065】また本実施例の燃料集合体を用いた炉心においては、炉停止余裕増大の観点からの炉心の余剰反応度（運転時冷温時反応度差）の低減に関し、本願発明者等は、実効増倍率及び運転時冷温時反応度差と炉心平均の水対燃料体積比との関係を検討した結果、図12に示す結果を得た。これは、図10に示す燃料集合体平均の水対燃料体積比と無限増倍率及び運転時冷温時反応度差との関係を炉心平均の水対燃料体積比と実効増倍率及び運転時冷温時反応度差との関係に換算したものであり、横軸が炉心平均の水対燃料体積比である（従来の炉心では約2.8）ことと燃料集合体の反応度を表す無限増倍率でなく炉心の反応度を表す実効増倍率となることを除いて、定性的な傾向は図10とほぼ同様である。すなわ

ち、水対燃料体積比 ≥ 3.0 以上であれば、従来以上に運転時冷温時の反応度差を低減し炉停止余裕の増大に効果があるが、水対燃料体積比 ≥ 3.5 で運転時における無限増倍率の値が従来技術の値を下回ってしまう。したがって、燃料集合体の大型化に際して炉停止余裕を増大させるためには、水対燃料体積比を $3.0 \sim 3.5$ とすれば有効であることが分かった。

【0066】本実施例の燃料集合体15を用いた炉心においては、水対燃料体積比 ≥ 3.3 であるので、上記条件を満足し、中性子スペクトルをソフトに（平均エネルギーを低く）して運転時冷温時反応度差を減少させて余剰反応度を低減し、炉停止余裕を増大させることができる。

【0067】したがって、本実施例の燃料集合体15によっても、水ロッド14の横断面積を増やしてギャップ水領域65の横断面積を減らし水ロッド内横断面積／燃料ペレットの横断面積 ≥ 1.0 とするので熱的余裕を確保でき、また水ロッド14の横断面積 $\geq 2.0\text{cm}^2$ として余剰反応度を低減するので、炉停止余裕を確保できる。またさらに本実施例の燃料集合体15によれば、燃料集合体平均の水対燃料体積比 ≥ 2.7 として余剰反応度を低減するので、炉停止余裕を確保できる。よって、燃料集合体を大型化して燃料集合体数を低減できるので、燃料交換作業の省力化が可能となる。

【0068】また、本実施例の燃料集合体15を用いた炉心によっても、ギャップ水領域65の横断面積を減らしギャップ水領域横断面積／燃料ペレットの横断面積 ≥ 0.6 とするので、局所出力ピーキング係数の値を低減し熱的余裕を確保することができ、かつ、燃料集合体15において水ロッド1本当たりの内横断面積が 2.0cm^2 であることによって上記炉停止余裕確保の効果を得る。

【0069】またさらに、本実施例の燃料集合体15を用いた炉心によれば、上記炉停止余裕確保の効果に加え、炉心平均の水対燃料体積比 ≥ 3.3 として運転時冷温時反応度差を減少し余剰反応度を低減するので、炉停止余裕を確保することができる。よって、炉心における燃料集合体数を低減できるので、燃料交換作業の省力化が可能となる。

【0070】本発明の第3の実施例を図13により説明する。本実施例の燃料集合体40の断面図を図13に示す。第1の実施例と共通の部品については共通の番号で示す。本実施例の燃料集合体40は、図1に示した第1の実施例の燃料集合体10において、水ロッド4を、減速材の流量が高いときには管内の水位が高く減速材の流量が低いときには管内の水位が低くなる二重管水ロッド42に置き換えたものである。その他の点は、第1の実施例とほぼ同様である。なお、二重管水ロッド42については、特開昭63-73187に詳しい。

【0071】上記構成の燃料集合体40によれば、第1の実施例の燃料集合体10により得られる熱的余裕・炉

停止余裕確保の効果に加え、流量制御によるスペクトルシフトの効果を増幅できるので、ウラン濃縮度を低減することができまた制御棒を挿入しない運転が可能となる。

【0072】また上記の燃料集合体40を装荷して構成した炉心の実施例でも、ウラン濃縮度の低減や制御棒を挿入しない運転に関し、燃料集合体40と同様の効果が得られる。

【0073】本発明の第4の実施例を図14及び図15により説明する。本実施例は本発明を水平断面が六角形の燃料集合体に適用した実施例である。本実施例の燃料集合体の断面図を図14に示す。第1及び第2の実施例と共通の部品については共通の番号で示す。本実施例の燃料集合体30においては、燃料集合体30の六角形の一辺は約 1.2cm 、炉心（後述）を構成する際の燃料集合体中心間距離 $Y \geq 2.2\text{cm}^2$ であり大型化が図られている。また燃料集合体30においては、チャンネルボックス22の内部にクラスタ制御棒7が挿入される構成となっており炉心を構成する際の燃料集合体間のギャップ水領域を第1の実施例に比べさらに狭めているので、水ロッド内横断面積／燃料ペレット横断面積比 ≥ 1.0 と第1の実施例に比しさらに大きくなっている。また水ロッド1本当たりの内横断面積 $\geq 1.5\text{cm}^2$ である。

【0074】以上の構成の本実施例の燃料集合体30において、本願発明者らは、第1の実施例において説明した図3における水ロッド内横断面積／燃料ペレット横断面積と径方向局所出力ピーキングとの関係は、燃料集合体の断面形状や燃料棒配列に関係なく本実施例の燃料集合体30においても成立することを得た。本実施例の燃料集合体30においては、水ロッド内横断面積／燃料ペレット横断面積 ≥ 1.0 であるので、局所出力ピーキングを低減し熱的余裕を増大させることができる。

【0075】また本願発明者らは、第1の実施例において説明した図4(a)及び図4(b)における水ロッド1本当たりの内横断面積と無限増倍率及び運転時冷温時反応度差との関係は、燃料集合体の断面形状や燃料棒配列に関係なく本実施例の燃料集合体30においても成立することを得た。本実施例の燃料集合体30においては水ロッド1本当たりの内横断面積 $\geq 1.5\text{cm}^2$ であるので、余剰反応度を低減し炉停止余裕を増大させることができる。

【0076】また本実施例の燃料集合体30を用いた炉心を図15に示す。図のように、燃料集合体30は各辺それぞれ1個合計6個の他の燃料集合体30に接する形で蜂の巣状に配置され炉心を構成する。本実施例の燃料集合体30を用いた炉心においては、上記燃料集合体30における熱的余裕の増大効果及び余剰反応度の低減による炉停止余裕の増大効果が得られる。

【0077】したがって、本実施例の燃料集合体30によれば、チャンネルボックス22の内部にクラスタ制御

棒が挿入され水ロッド内横断面積／燃料ペレット横断面積比 ≈ 1.0 とするので熱的余裕を確保でき、また水ロッド41の横断面積を 15cm^2 として余剰反応度を低減するので炉停止余裕を確保できる。よって、燃料集合体を大型化して燃料集合体数を低減できるので、燃料交換作業の省力化が可能となる。

【0078】また、本実施例の燃料集合体30を用いた炉心によれば、上記効果と同様の効果を得る。

【0079】なお、上記第4の実施例において、燃料集合体の断面形状を六角形としたが、三角形、菱形、円など、その他の形状としても本発明は適用でき、同様の効果を得る。

【0080】また以上の第1～第4の実施例においては、燃料として濃縮ウラン酸化物を、炉心構造材としてジルカロイを、減速材及び冷却材として水をそれぞれ使用したが、その他の燃料、構造材、減速材、冷却材を使用した場合にも本発明は適用でき、同様の効果を得る。

【0081】

【発明の効果】本発明によれば、減速棒の減速材が満たされる部分の横断面積／燃料ペレットの横断面積の軸方向平均値 ≥ 0.4 とするので、熱的余裕を確保できる。よって燃料集合体を大型化して燃料集合体数を低減し燃料交換作業の省力化を図れる。

【0082】また、減速棒1本当たりの減速材の横断面積を $14\sim 50\text{cm}^2$ とするので、余剰反応度を低減して炉停止余裕を確保できる。よって燃料集合体を大型化して燃料集合体数を低減し燃料交換作業の省力化を図れる。さらに、上部タイプレートの外縁を鉛直下方に伸ばした面で囲まれる水平断面における減速材の横断面積の総和／燃料ペレットの横断面積の総和 $\approx 2.7\sim 3.4$ とするので、余剰反応度を低減して炉停止余裕を確保できる。また減速棒の少なくとも1本を二重管水ロッドとするので、流量制御によるスペクトルシフトの効果を増幅してウラン濃縮度を低減できまた制御棒を挿入しない運転が可能となる。

【0083】また、燃料集合体の周囲のギャップ水領域に満たされた減速材の横断面積の総和／燃料ペレットの横断面積の総和 ≤ 0.7 とするので、局所出力ピーキング係数の値を低減して熱的余裕を確保できる。よって炉心における燃料集合体数を低減し燃料交換作業の省力化を図れる。さらに吸収棒の表面積の総和／燃料棒の表面積の総和 ≥ 0.20 とするので、制御棒値を高め炉停止余裕を確保できる。また吸収棒の横断面積の総和／ギャップ水領域の横断面積の総和 ≥ 0.4 とするので、制御棒値を高め炉停止余裕を確保できる。さらに減速材の横断面積の総和／燃料ペレットの横断面積の総和 $\approx 3.0\sim 3.5$ とするので、余剰反応度を低減して炉停止余裕を確保できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施例の燃料集合体の水平断面

図である。

【図2】チャンネルボックスを取り外した状態の燃料集合体の側面断面図である。

【図3】水ロッド内横断面積と燃料ペレット横断面積との比の変化に対する局所出力ピーキング係数の変化を示す図である。

【図4】水ロッド1本当たりの内横断面積の変化に対する無限増倍率及び運転時冷温時反応度差の変化を示す図である。

10 【図5】ギャップ水領域横断面積と燃料ペレット横断面積との比の変化に対する局所出力ピーキング係数の変化を示す図である。

【図6】吸収棒表面積と燃料棒表面積との比の変化に対する炉停止余裕の変化を示す図である。

【図7】吸収棒横断面積とギャップ水領域横断面積との比の変化に対する炉停止余裕の変化を示す図である。

【図8】本発明の第2の実施例の燃料集合体の水平断面図である。

20 【図9】水ロッド内横断面積と燃料ペレット横断面積との比の変化に対する局所出力ピーキング係数の変化を示す図である。

【図10】燃料集合体平均の水対燃料体積比の変化に対する無限増倍率及び運転時冷温時反応度差の変化を示す図である。

【図11】ギャップ水領域横断面積と燃料ペレット横断面積との比の変化に対する局所出力ピーキング係数の変化を示す図である。

30 【図12】炉心平均の水対燃料体積比の変化に対する実効増倍率及び運転時冷温時反応度差の変化を示す図である。

【図13】本発明の第3の実施例の燃料集合体の水平断面図である。

【図14】本発明の第4の実施例の燃料集合体の水平断面図である。

【図15】第4の実施例の燃料集合体を用いた炉心の水平断面図である。

【符号の説明】

- 1 燃料棒
- 4 水ロッド
- 6 十字型制御棒
- 10 燃料集合体
- 11 燃料ペレット
- 14 水ロッド
- 15 燃料集合体
- 20 被覆管
- 21, 22 チャンネルボックス
- 30 燃料集合体
- 40 燃料集合体
- 41 水ロッド
- 42 二重管水ロッド

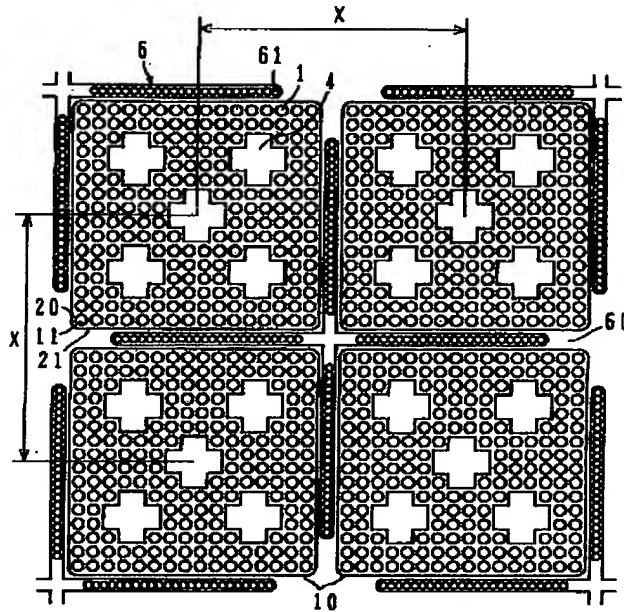
17

18

60 ギャップ水領域
61 吸収棒

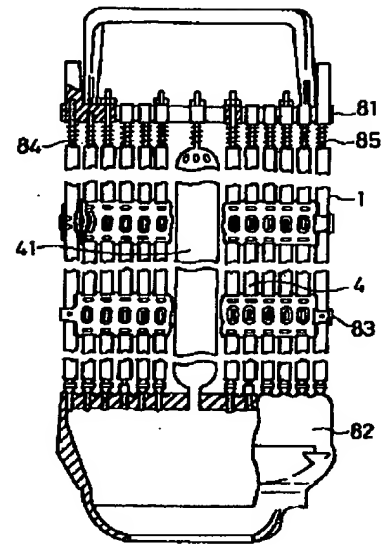
81 上部タイプレート
X 燃料集合体中心間距離
Y 燃料集合体中心間距離

【図1】



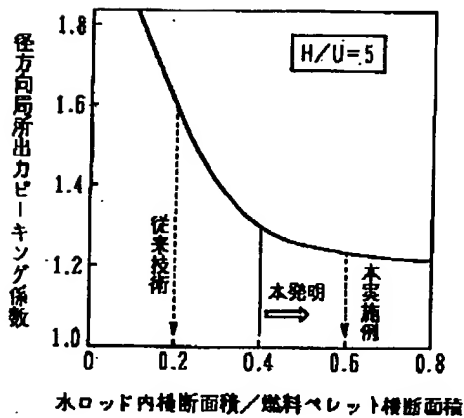
1: 燃料棒
4: 水ロッド
6: 十字型制御棒
10: 燃料集合体
11: 燃料ペレット
20: 被覆管
21, 22: チャンネルボックス
60: ギャップ水領域
61: 吸収棒

【図2】

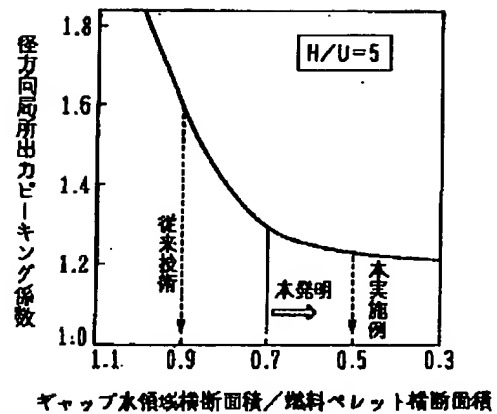


81: 上部タイプレート

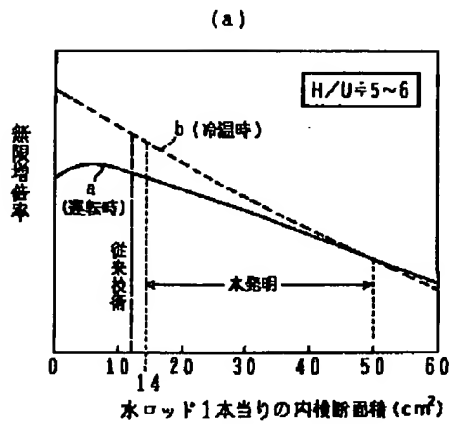
【図3】



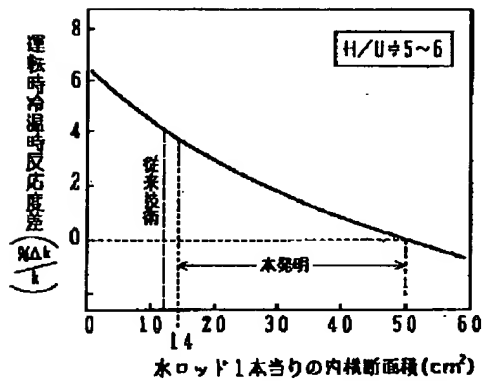
【図5】



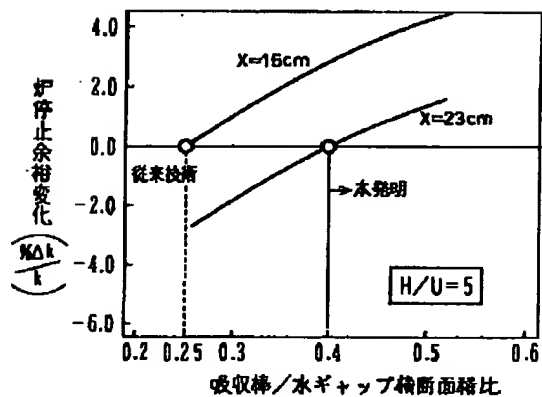
【図4】



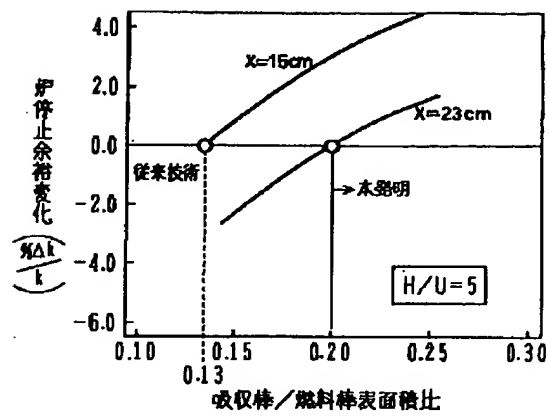
(b)



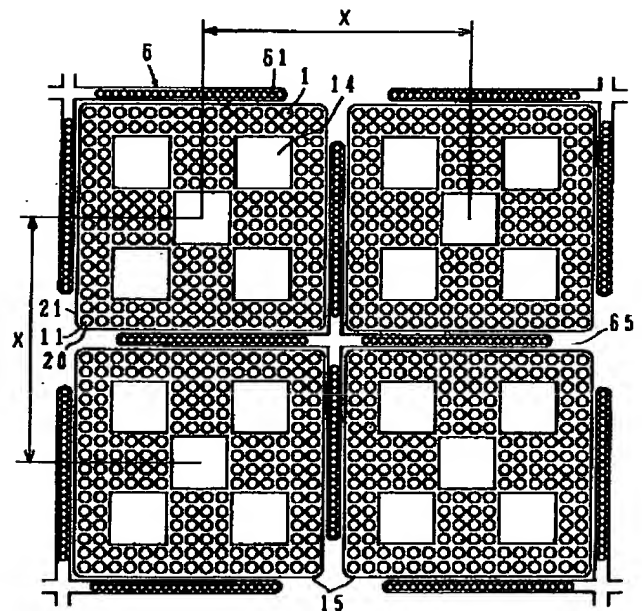
【図7】



【図6】

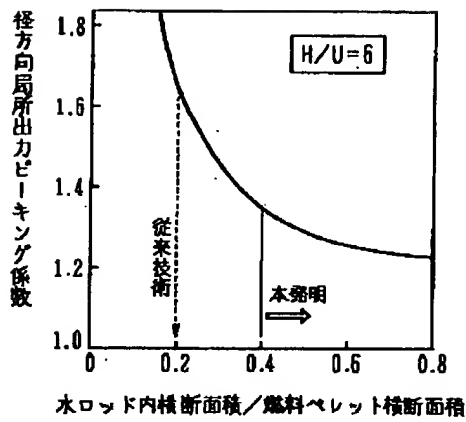


【図8】

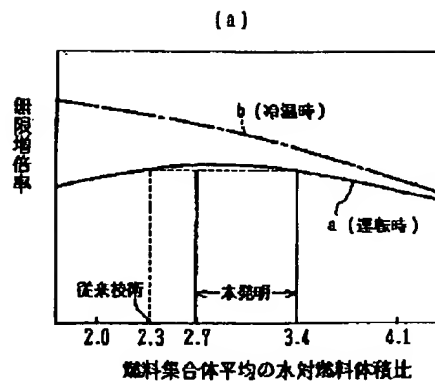


14: 水ロッド
15: 燃料集合体
65: ギャップ水領域

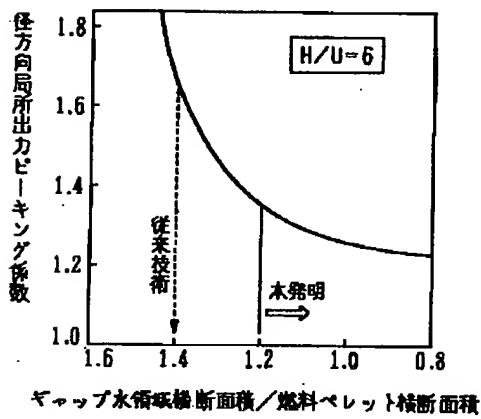
【図9】



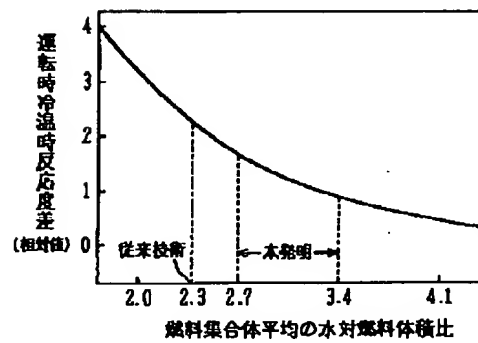
【図10】



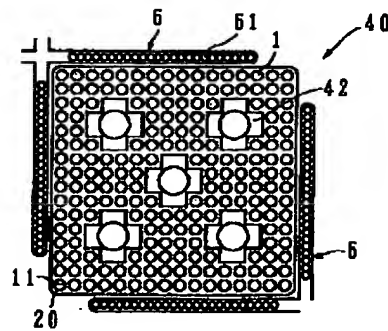
【図11】



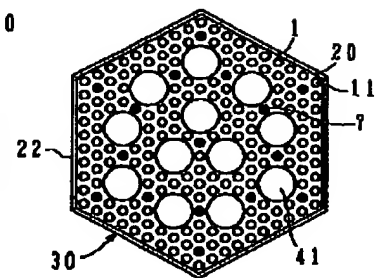
(b)



【図13】



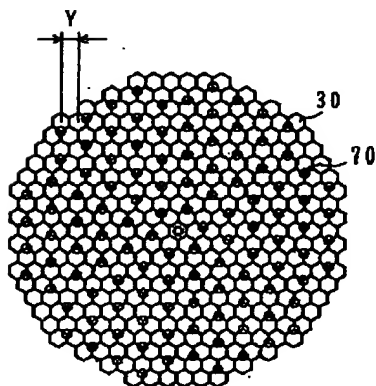
【図14】



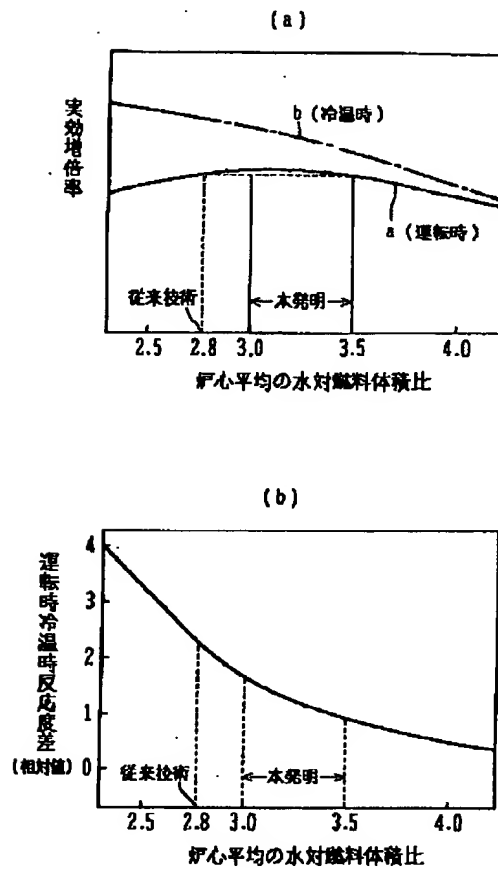
30 : 燃料集合体
41 : 水ロッド

40 : 燃料集合体
42 : 二重管水ロッド

【図15】



【図12】



フロントページの続き

(72)発明者 石橋 洋子
茨城県日立市大みか町七丁目2番1号 株
式会社日立製作所エネルギー研究所内

(72)発明者 持田 貴顕
茨城県日立市幸町三丁目1番1号 株式会
社日立製作所日立工場内
(72)発明者 曾根田 秀夫
茨城県日立市幸町三丁目1番1号 株式会
社日立製作所日立工場内